

## ФІЗИКА ТА МЕХАНІКА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.923

**Т.М. БРИЖАН**, Мариуполь, Україна

**Н.В. КРЮКОВА**, Харків, Україна

### **УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

У статті наведені результати теоретичних досліджень енергоємності механічної обробки. Аналітично встановлено, що між енергоємністю обробки й коефіцієнтом усадки стружки існує прямо пропорційний зв'язок. Показано, що основною умовою зменшення енергоємності обробки є зменшення інтенсивності тертя стружки, що сходиться, з передньою поверхнею інструмента за рахунок дроблення стружки в зоні стружкоутворення, зміни кута сходу стружки з передньої поверхні інструмента й т.д.

В статье приведены результаты теоретических исследований энергоёмкости механической обработки. Аналитически установлено, что между энергоёмкостью обработки и коэффициентом усадки стружки существует прямо пропорциональная связь. Показано, что основным условием уменьшения энергоёмкости обработки является уменьшение интенсивности трения сходящей стружки с передней поверхности инструмента за счёт дробления стружки в зоне стружкообразования, изменения угла схода стружки с передней поверхности инструмента и т.д.

This article presents the results of theoretical studies of the energy intensity of machining. Analytically found that between power consumption and processing shrinkage chips directly proportional relationship exists. It was shown that the fundamental requirement is the reduction of energy consumption reduction processing converging intensity of friction with the front surface of the chip due to the crushing tool to the chip area of chip, changing the angle of the chip from the front surface of the tool, etc.

**Введение.** Обеспечение высокоточной обработки деталей машин является важнейшей задачей технологии машиностроения. Однако, несмотря на большой практический опыт, накопленный в этом направлении, достижение высоких показателей точности обработки, как

правило, связано с высокой трудоемкостью обработки и необходимостью применения дополнительных финишных операций. Установлено, что основным условием повышения точности и снижения точности обработки является уменьшение энергоемкости обработки, т.е. энергии, затрачиваемой на съем единицы объема обрабатываемого материала. В связи с этим, актуальна задача определения технологических закономерностей уменьшения энергоемкости обработки при резании лезвийным инструментом, в частности, при обработке глубоких отверстий, которая традиционно характеризуется низкими показателями точности обрабатываемых поверхностей.

**Анализ последних достижений и литературы.** Вопросы энергоемкости механической обработки отражены в работах [1-4]. Однако они представлены в виде результатов экспериментальных исследований, справедливых для частных условий обработки, что не позволяет в полной мере выявить и обосновать основные направления снижения энергоемкости обработки. Известны также работы [5,6], в которых предложены расчетные схемы для определения энергоемкости обработки и приведено ее аналитическое описание. Установлено, что энергоемкость обработки зависит главным образом от условного угла сдвига обрабатываемого материала. Поэтому изыскание условий уменьшения этого угла открывает новые технологические возможности уменьшения энергоемкости обработки и соответственно повышения точности, производительности и других показателей механической обработки.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является теоретическое обоснование условий уменьшения энергоемкости обработки для решения задач технологического обеспечения высокоточной обработки деталей машин.

**Материалы исследования.** Для анализа путей уменьшения силовой напряженности механической обработки рассмотрим аналитические зависимости для определения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания, а также условного напряжения резания  $\sigma$ , приведенных в работе [5]:

$$P_z = \sigma \cdot S = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot S}{K_{рез}} = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right) = \frac{\sigma_{сж}}{\operatorname{tg} \beta}; \quad (3)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м<sup>2</sup> (или Дж/м<sup>3</sup>);  $S = a \cdot b$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>;  $a, b$  – толщина и ширина среза, м;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{рез} = P_z / P_y = \operatorname{tg} 2\beta = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma)$  – коэффициент резания;  $\beta$  – условный угол сдвига обрабатываемого материала;  $\psi$  – условный угол трения на передней поверхности инструмента ( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения);  $\gamma$  – передний угол инструмента.

В работе (5) показано, что условное напряжение резания  $\sigma$  по физической сути соответствует энергоемкости обработки. Это связано с тем, что зависимость для определения энергоемкости обработки  $A / \mathcal{G}_{объем}$  (где –  $A = P_z \cdot l$  работа резания, Дж;  $l$  – длина пути резания, м;  $\mathcal{G}_{объем} = S \cdot l$  – объем снятого материала, м<sup>3</sup>;  $s$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>) можно представить в виде, который определяет условное напряжение резания  $\sigma$  или удельную работу резания. Размерность энергоемкости обработки (Дж/м<sup>3</sup>) с учетом того, что Дж=Н·м принимает вид: Н/м<sup>2</sup>, т.е. соответствует размерности условного напряжения резания  $\sigma$ . Таким образом, используя зависимость (3), можно проводить анализ энергоемкости обработки при резании как лезвийными, так и абразивными инструментами.

Как следует из приведенных зависимостей, основное влияние на параметры  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  оказывает коэффициент резания  $K_{рез}$ . С его увеличением параметры  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  непрерывно уменьшаются, причем

радиальная  $P_y$  составляющая силы резания в большей степени, что указывает на возможность повышения точности обработки.

Необходимо отметить, что приведенные зависимости (1) и (2) определяют составляющие силы резания, непосредственно участвующие в процессе стружкообразования при резании. Так, установлено, что при точении стали тангенциальная  $P_z$  составляющая силы резания, рассчитанная по зависимости (1), меньше ее экспериментально измеренного значения. Это связано с тем, что значительная часть экспериментально измеренной тангенциальной  $P_z$  составляющая силы резания обусловлена трением сходящей стружки с передней поверхностью резца. Поэтому она фактически не участвует в процессе сдвига обрабатываемого материала в условной плоскости сдвига  $OA$  (рисунок 1). Исходя из этого, экспериментально измеренную тангенциальную  $P_z$  составляющую силы резания можно представить суммой двух слагаемых  $P_z = P_{z_{рез}} + P_{z_{тр}}$ , где  $P_{z_{рез}}$ ,  $P_{z_{тр}}$  – составляющие, обусловленные процессами стружкообразования и трения на передней поверхности резца, Н. По сути, процесс сдвига материала в условной плоскости сдвига материала  $OA$  происходит под действием лишь составляющей  $P_{z_{рез}}$  и соответственно радиальной  $P_y$  составляющей силы резания. Составляющая  $P_{z_{тр}}$  непосредственно не оказывает влияния на процесс стружкообразования, поскольку она затрачивается на преодоление трения сходящей стружки с передней поверхностью резца.

Поскольку при обработке стали  $P_{z_{рез}} < P_{z_{тр}}$ , то в первом приближении можно рассматривать  $P_{z_{рез}} / P_y \approx K_{рез}$ ;  $P_{z_{тр}} / P_y \approx 1 / f$ , где  $f$  – коэффициент трения на передней поверхности резца. При таком представлении процесса резания вполне очевидно, что коэффициент резания  $K_{рез}$  может принимать значения меньше единицы, а это приводит к уменьшению условного угла сдвига материала  $\beta$  (рисунок 1) и повышению энергоемкости обработки, определяемой параметром  $\sigma$  в соответствии с зависимостью (3).

На рисунке 1 показаны толщина среза  $a$ , скорость резания  $V$ , сила резания  $P$  и условный угол трения обрабатываемого материала с передней

поверхностью резца  $\psi$ , который связан с коэффициентом трения  $f$  тригонометрической зависимостью:  $\operatorname{tg} \psi = f$  [6].

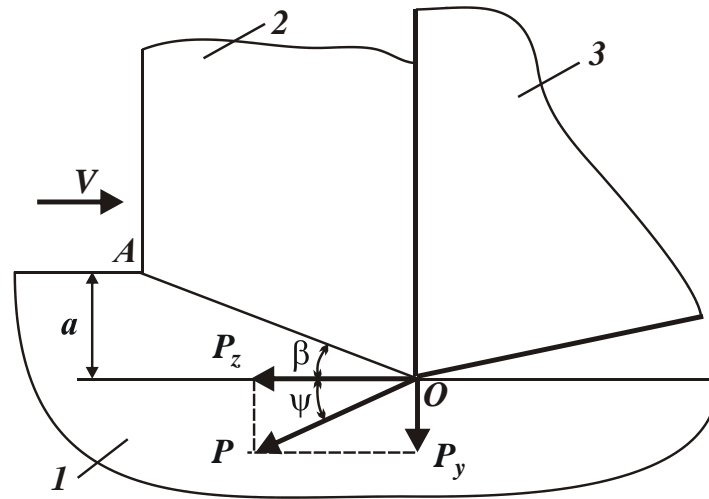


Рисунок 1 – Расчетная схема параметров процесса резания:

1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка;  
3 – режущий инструмент

Если воспользоваться известной формулой профессора Тиме А.Н. для определения условного угла сдвига материала  $\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}$  [4], рассматривая в первом приближении  $K_L \gg \sin \gamma \approx 0$ ;  $\cos \gamma \approx 1$ , то зависимость (3) может быть представлена:

$$\sigma = \sigma_{сж} \cdot K_L, \quad (4)$$

где  $K_L$  – коэффициент усадки стружки ( $K_L \geq 1$ ).

Как видно, условное напряжение резания  $\sigma$  прямо пропорционально связано с коэффициентом усадки стружки  $K_L$ . Большим значениям  $\sigma$  соответствуют большие значения  $K_L$ . По сути, коэффициент усадки стружки  $K_L$  определяет во сколько раз условное напряжение резания  $\sigma$  превышает предел прочности на сжатие обрабатываемого материала  $\sigma_{сж}$ . Исходя из зависимости (3) это означает, что увеличение коэффициента

усадки стружки  $K_L \geq 1$  обусловлено уменьшением коэффициента резания  $K_{рез} < 1$ . Соответственно зависимость (3) может быть представлена в виде:

$$K_L = \frac{1}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right). \quad (5)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (5) значения коэффициента усадки стружки  $K_L$ .

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициента усадки стружки  $K_L$

$K_{рез}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	2	5
$K_L$	$\infty$	20	10	6,8	5,2	4,2	3,2	2,4	1,6	1,2

Как видно, с уменьшением коэффициента резания  $K_{рез}$  коэффициент усадки стружки  $K_L$  непрерывно увеличивается. Практикой установлено, что при точении коэффициент усадки стружки  $K_L$  принимает значения в пределах 1...8. Следовательно, коэффициент резания  $K_{рез}$  может изменяться в широких пределах, принимая значения как меньше, так и больше единицы. При условии  $K_{рез} < 1$  коэффициент усадки стружки  $K_L$  значительно больше единицы. Этим показано, что увеличение коэффициента усадки стружки  $K_L$  связано с уменьшением коэффициента резания  $K_{рез}$ , который может принимать значения меньше единицы, хотя по экспериментальным установленным данным отношение  $P_z/P_y$  при точении стали всегда больше единицы и подчиняется зависимости  $P_z/P_y = 1/f$ . Следовательно, уменьшить коэффициент усадки стружки  $K_L$  и соответственно повысить эффективность механической обработки можно увеличением коэффициента резания  $K_{рез} > 1$ . Это достигается уменьшением радиальной  $P_y$  составляющей силы резания, обусловленной трением сходящей стружки с передней поверхностью резца, в первую очередь, за счет снижения коэффициента трения  $f$ . Важным фактором уменьшения

радиальной  $P_y$  составляющей силы резания, судя по экспериментальным данным, приведенным в многочисленных литературных источниках, является увеличение переднего угла инструмента  $\gamma$  и обеспечение высокой остроты режущего лезвия инструмента. Эффективным путем также является обеспечение условий дробления стружки в зоне резания или изменение угла схода стружки с передней поверхности инструмента, применяя для этого, например, косоугольное резание и т.д.

Пренебрегая величиной  $K_{рез}^2$  в подкоренном выражении зависимости (5), поскольку  $K_{рез}^2 < 1$ , данная зависимость упростится и примет вид:

$$K_L = \frac{2}{K_{рез}}. \quad (6)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по зависимости (6) значения коэффициента усадки стружки  $K_L$ .

Таблица 2 – Расчетные значения коэффициента усадки стружки  $K_L$

$K_{рез}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	2	5
$K_L$	$\infty$	20	10	6,7	5,0	4,0	2,8	2,0	1,0	–

Как видно, при условии  $K_{рез} < 0,7$  значения коэффициента усадки стружки  $K_L$ , рассчитанные по зависимостям (5) и (6), мало отличаются. Поэтому в этих пределах изменения коэффициента резания  $K_{рез}$  расчет  $K_L$  можно производить по упрощенной зависимости (6).

**Выводы.** В работе приведены результаты теоретических исследований энергоемкости механической обработки. Аналитически установлено, что между энергоемкостью обработки и коэффициентом усадки стружки существует прямо пропорциональная связь, т.е. большему значению энергоемкости обработки соответствует большее значение коэффициента усадки стружки. Показано, что основным условием уменьшения энергоемкости обработки является уменьшение

интенсивности трения сходящей стружки с передней поверхности инструмента. Это может быть достигнуто как за счет уменьшения коэффициента трения на передней поверхности инструмента и переднего угла инструмента, так и за счет дробления стружки в зоне стружкообразования, изменения угла схода стружки с передней поверхности инструмента и т.д.

**Список использованных источников:** 1. Гусарев В.С. Энергетическая эффективность технологических процессов / В.С. Гусарев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. – Харьков: ХАИ, 2000. – Вып. 14. – С. 41-44. 2. Гусарев В.С. Исследование удельной работы формообразования при точении / В.С. Гусарев, Ю.В. Яровой // *Труды Одесского политехнического университета*. – Одесса: ОНПУ, 2010. – Вып. 1.(33) – 2(34). – С. 61-65. 3. Швец В.В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В.В. Швец. – М.: Машиностроение, 1967. – 63 с. 4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gusarev V.S. Jenergeticheskaja jeffektivnost' tehnologicheskikh processov / V.S. Gusarev // *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. – Trudy Gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. N.E. Zhukovskogo “HAI”. – Har'kov: HAI, 2000. – Vyp. 14. – S. 41-44. 2. Gusarev V.S. Issledovanie udel'noj raboty formoobrazovanija pri tochenii / V.S. Gusarev, Ju.V. Jarovoj // *Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta*. – Odessa: ONPU, 2010. – Vyp. 1.(33) – 2(34). – S. 61-65. 3. Shvec V.V. Nekotorye voprosy teorii tehnologii mashinostroenija / V.V. Shvec. – M.: Mashinostroenie, 1967. – 63 s. 4. c Osnovy teorii rezanija metallov / V.F. Bobrov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 343 s. 5. Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija / Pod obshh. red. F.V. Novikova i A.V. Jakimova. V desjati tomah. – T. 1. “Mehanika rezanija materialov” – Odessa: ONPU, 2002. – 580 s. 6. Teoreticheskie osnovy rezanija i shlifovanija materialov: ucheb. posobie / A.V. Jakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 450 s.